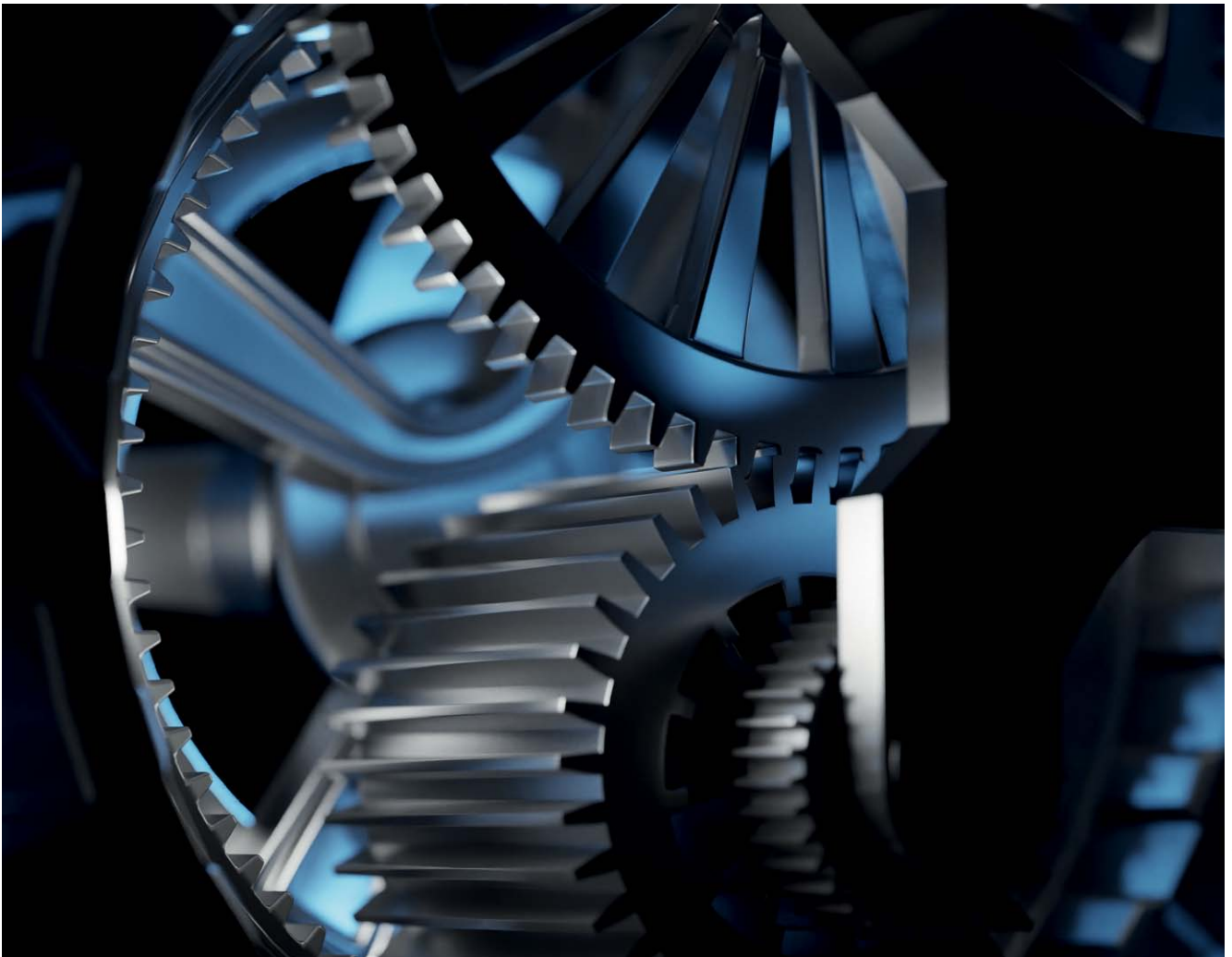


Praxisbeispiel Sensorfusion

Der unsichtbare Drehmomentsensor



(Bild: Herman Schmidt/stock.adobe.com)

In vielen mechanischen Systemen sind Drehmomentsensoren für das Regeln oder Messen der übertragenen mechanischen Leistung gewünscht und hilfreich. Dieser Wunsch ist jedoch schwer zu erfüllen, denn einerseits lässt sich das Drehmoment nur aus der Wirkung auf einen mechanischen Körper erkennen, andererseits ist der in den meisten Fällen in Rotation. Wie man die Wirkung auf einen mechanischen Körper unter Rotation misst, zeigt ein Beispiel aus der Praxis. Von Arno Erzberger

Für Drehmomentsensoren gibt es drei weitverbreitete Anwendungen:

- Leistungsmessungen an Prüfständen
- Messung der menschlichen Tretleistung im Pedelec-Kurbelantrieb
- Messung des Lenkmoments in Kraftfahrzeugen

Die aktuell verfügbaren Drehmomentsensoren, die für diese Anwendungen zum Einsatz kommen, lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

- Drehmomentsensoren mit zusätzlichem integriertem (weichem) Torsionselement
- Drehmomentsensoren ohne zusätzliches Torsionselement

Das Torsionselement dient dazu, eine definierte, leicht messbare elastische Verdrehung an einer Stelle des Torsionsstabes zu erzeugen, dort die Verdrehung zu messen und daraus das Drehmoment zu ermitteln.

Drehmomentsensoren ohne Torsionselement verfügen über hochempfindliche Elemente, die geringe mechanische Verformungen messen (z. B. Dehnmessstreifen) oder Elemente, die typische physikalische Änderungen im Metallgefüge feststellen (z. B. über Magnetostraktion) und daraus den Drehmomentwert ermitteln.

In vielen Applikationen – vor allem bei der Übertragung hoher Drehmomente – sind weiche Torsionselemente nicht einsetzbar, weil das System für den primären mechanischen Zweck steif sein muss. Die Drehmomentsensoren ohne Torsionselemente sind meist komplex aufgebaut und daher teuer. Zusätzlich müssen Energieversorgung, Erregungsspannungen oder Signale berührungslos vom drehenden auf den stationären Teil übertragen werden. Hierfür werden induktive Kopplung, magnetische Kopplung oder Funkübertragung verwendet. Diese Arten der Übertragung erhöhen die Komplexität und die Kosten.

Aus den genannten Gründen werden in vielen Systemen Drehmomentsensoren vermieden, obwohl diese die Eigenschaften des Systems verbessern würden. Oft behilft man sich damit, das Drehmoment aus bekannten Größen im System zu schätzen und somit einen virtuellen Ansatz zu wählen – etwa

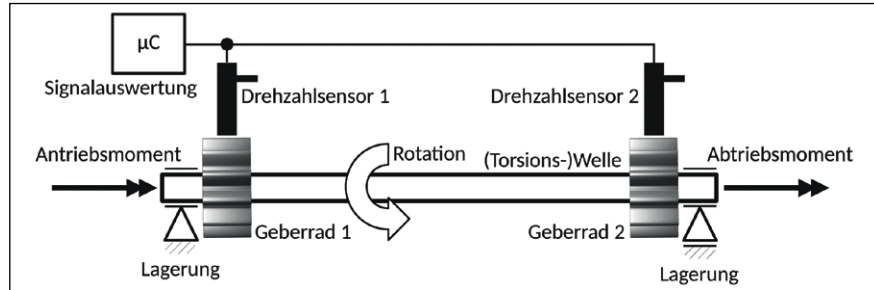


Bild 1. Prinzipaufbau der Drehmomentmessung. (Bild: Erzberger)

über die aktuelle elektrische Leistung in Elektroantrieben, bei bekanntem Systemübertragungsverhalten und bekannten Verlusten.

Eine bewährte Methode

Es gibt aber noch eine weitere althergebrachte Methode, diese ist seit vielen Jahrzehnten bekannt, aber in Vergessenheit geraten. Es ist die Phasenmessung zwischen zwei Drehzahlensignalen unter der Verwendung der Antriebswelle als Torsionselement (**Bild 1**). Am Anfang der Antriebswelle wird die Drehzahl über ein periodisches Signal (z. B. Rechtecksignal) auf der Antriebsseite gemessen. Im größtmöglichen Abstand wird auf derselben Welle an der Abtriebsseite wieder die Drehzahl auf die gleiche Weise gemessen. Die Welle dazwischen ist somit das Torsionselement, und der Phasenversatz zwischen der Eingangs- und der Ausgangsdrehzahl ist ein Maß für die Wellenverdrehung – und somit, bei bekannter Steifigkeit, ein direktes Maß für das anliegende Drehmoment (**Bild 2**). Diese Methode ist Stand der Technik und wurde z. B. bereits 1992 im US-Patent 5297044 anschaulich beschrieben. Mit den nun aktuell verfügbaren Drehzahlsensoren lässt sich dieses Verfahren kostengünstig mit Standardbauteilen umsetzen.

Was ist der Sensor?


Das Sensorsystem besteht aus den zwei Drehzahlsensoren mit Auswerteschaltung, zwei Geberrädern und der Welle als Torsionselement. Somit lässt sich das System in drei Teilsysteme aufteilen:

- Drehzahlsensoren am Antrieb und am Abtrieb mit Schnittstellen zu den

Geberrädern und elektrischer Schnittstelle zur Signalauswerteschaltung

- Signalauswerteschaltung zur Ermittlung des Drehmomentmesswertes
- Torsionswelle mit jeweils einem Geberrad am Antrieb und am Abtrieb


Zwei Sensorelemente aus der Elektronik, die beispielsweise baugleich gewählt werden, treffen auf die Torsionswelle mit Geberrädern als Element aus dem Maschinenbau und die elektronische Auswertung. Somit lässt sich für die Signalentstehung das Sensorsystem in zwei Grundkomponenten zerlegen, die einzeln nach der jeweiligen Disziplin konfiguriert werden. Die



emlix
embedded linux systems

Industrial Linux Solutions

- Mainline-based Linux
- Yocto Engineering
- Automated Testing
- Linux Qualification
- Lifecycle Maintenance



www.emlix.com

Wechselwirkung der beiden Grundkomponenten beschränkt sich auf die Wechselwirkung zwischen Drehzahlsensor und Geberrad.

Die Auswahl des Sensorprinzips erfolgt nach den Anforderungen des Systems. Rein physikalisch würde sich ein optisches Lichtschrankensystem anbieten, weil sich damit eine hohe Ortsauflösung durch eine geeignete Optik und das Geberrad darstellen lässt und die Totzeit auf einfache Weise gering gehalten werden kann. Da im folgenden Beispiel aber einen typischen Einsatz in einem Getriebe betrachtet werden soll, bietet sich aufgrund von Temperaturanforderungen bis 150 °C, Ölumgebung und Schmutzeintrag eine robuste und kostengünstige magnetische Hallsensorlösung an.

Die elektronische Seite hat folgende Anforderungen:

- Hohe Ortsauflösung am Geberrad
- Drehmomentauswertung mit geringer Laufzeit
- Laufzeitarme Übertragung der Rechtecksignale des Drehzahlsensors zur Signalauswertung
- Laufzeitarme Signalaufbereitung in den Drehzahlsensoren
- Symmetrische Rechtecksignale mit konstantem 50-%-Tastverhältnis (High/Low)

→ Signalentstehung mit geringer Beeinflussung durch mechanische Toleranzen

- Die mechanischen Anforderungen sind:
- Torsionswelle, die im Messbereich des Drehmomentes eine Verdrehung von ca. einer Zahn-Lücken-Länge erreicht
- Linearer Torsionsverlauf
- Abstand der Geberräder zueinander groß wählen
- Geberräder an Positionen mit niedrigen mechanischen Toleranzen anordnen
- Geberräder mit möglichst vielen Zähnen, aber den Durchmesser nicht zu groß wählen
- Geberradgeometrie für 50-%-Signal-Tastverhältnis

Die Wechselwirkungen zwischen Elektronik und Mechanik ist:

- Eine iterative geometrische Auslegung der Geberradverzahnung mit den Sensoreigenschaften, um die elektronischen und mechanischen Anforderungen abzudecken

Beispiel aus der Praxis

Die Sensorkonzept-Auslegung: Die höchste Ortsauflösung bei magnetischen Hallsensoren erhält man mit

Differenzhallsensoren mit geringem Hallplattenabstand. Die geringste Signallaufzeit erhält man mit Hallsensoren mit einfacher hardwarenaher Signalauswertung im Hallchip und direkter Übertragung mit TTL-Ausgangssignalen, die jeweils eine Zahn-Lücken-Kombination des Geberrades abdecken. Für eine stabiles 50-%-Tastverhältnis hilft sensorseitig ein Schalten des Ausgangssignals im Nulldurchgang des analogen Hallsignals und einer adaptiven Schaltschwelle mit geringer Hysterese, um den Einfluss von Luftspaltschwankungen zu reduzieren.

Die Mechanikkonzept-Auslegung:

Um den Messbereich des Hallensorsystems möglichst gut auszunutzen und ein eindeutiges Signal zu erhalten, sollte der Torsionswinkel der Welle über den Messbereich circa eine Zahn-Lücken-Länge betragen. Die Geberräder müssen mit einem großen Abstand zueinander, torsionssteif mit der Welle verbunden sein, und das Torsionsverhalten der Welle muss ohne Unstetigkeiten linear sein. Um dynamische mechanische Toleranzeinflüsse gering zu halten, ist die Platzierung der Geberräder nahe an den Lagerstellen vorteilhaft. Die Verzahnung der Geberräder soll im Zusammenspiel mit dem Sensor ein Tastverhältnis von 50 % erreichen. Hierbei gilt es zu untersuchen, ob dies mit einem vorhandenen Zahnrad im Getriebe möglich ist oder ob zusätzliche Sensorgeberräder integriert werden müssen.

Das Signalauswerte-Konzept:

Die Signalauswertung soll an dieser Stelle nicht im Detail dargestellt werden. Als anschauliche Lösung kann eine einfache Signalauswertung mithilfe eines XOR-Gatters (Exklusiv-Oder-Gatter) dienen. Die Eingänge werden direkt mit den TTL-Signalen der Hallsensoren beaufschlagt, und der Ausgang liefert in Form eines zeitlichen PWM-Signals ein Maß für den Phasenversatz der Signale und somit für die Verdrehung bzw. mit bekannter Wellensteifigkeit einen Messwert für das Drehmoment (**Bild 3 und 4**). In der

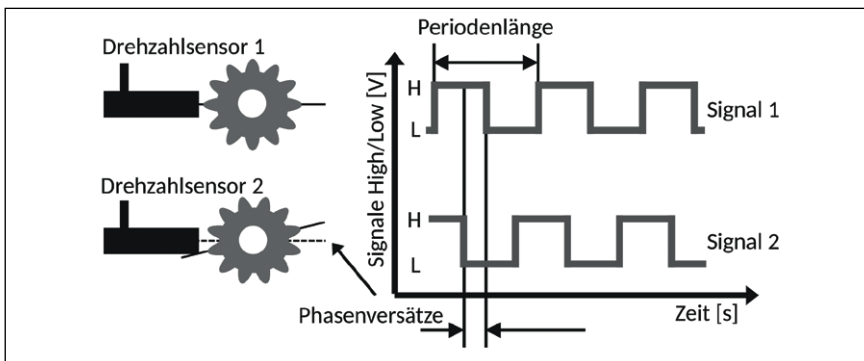


Bild 2. Prinzipdarstellung der Sensorsignale und des resultierenden Phasenversatzes. (Bild: Erzberger)

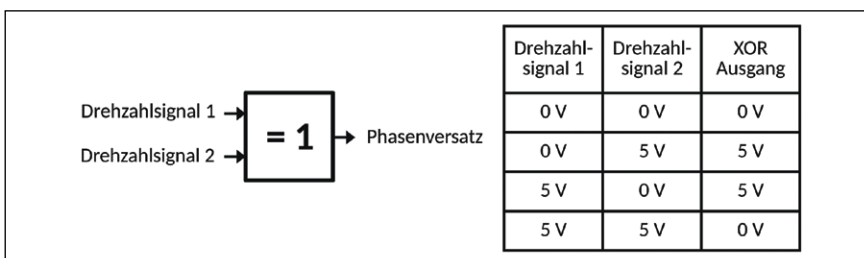


Bild 3. Vereinfachte Auswertelogik mit XOR-Gatter und Wahrheitstabelle (TTL-Logik). (Bild: Erzberger)

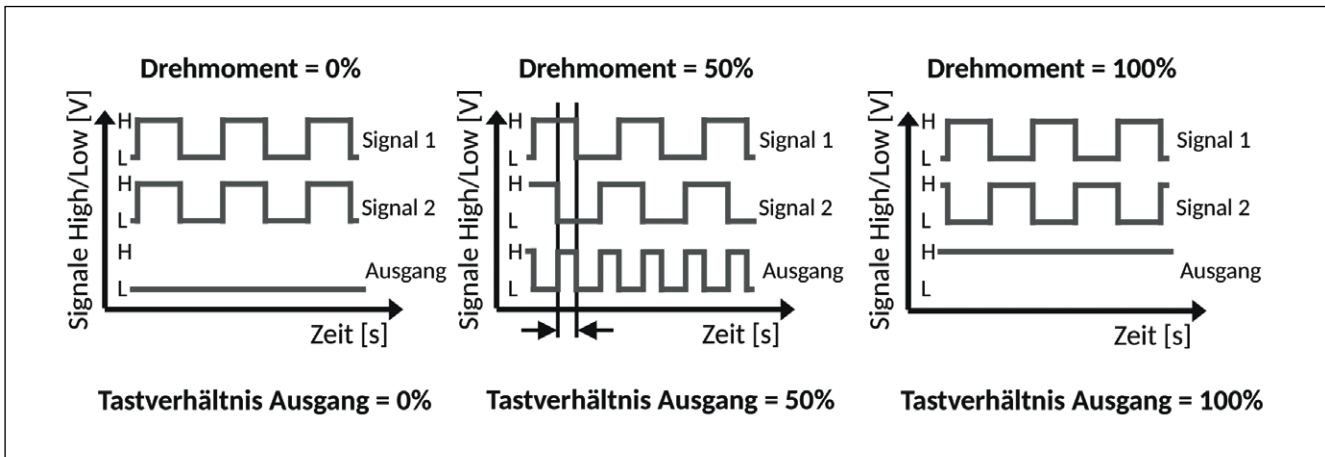


Bild 4. Eingangssignale und Ausgangssignale für 0 %, 50 % und 100 % Drehmoment. (Bild: Erzberger)

konkreten Applikation wird die Auslegung entsprechend der verfügbaren Möglichkeiten im Steuergerät erfolgen.

Die Geberrad-Auslegung:

Um eine möglichst feine Ortsauflösung zu erhalten, können Differenzhallsensoren mit einem möglichst geringen Hallplattenabstand von etwa 2 mm gewählt werden. Diese können als Untergrenze Zahn-Lücken-Kombinationen von ca. 4 bis 5 mm Länge auflösen. Zahnradmoduln von 1,25 bzw. 1,5 ergeben eine Länge von $1,25 \times \pi \approx 3,9$ mm bzw. $1,5 \times \pi \approx 4,7$ mm. Das Unterschreiten der unteren Grenze kann zu instabilem Verhalten führen, somit ist Modul 1,5 die richtige Wahl.

Die Torsionswellen-Auslegung:

Für das Beispiel wird eine Stahlwelle mit 12 mm Durchmesser und einer Länge von 400 mm mit einem Geberraddurchmesser von circa 80 mm gewählt. Bei einem Schubmodul von Stahl mit 81 GPa und einem maximalen Drehmoment von 30 Nm ergibt sich eine maximale Verdrehung von circa 4° bei einer maximalen Torsionsspannung von circa 90 N/mm^2 in der Welle. Ein Zahnrad mit Modul 1,5 und circa 80 mm Durchmesser besitzt 51 Zähne. Mit $360^\circ / 51 \text{ Zähne} \approx 7,1^\circ$ Zahn-Lücken-Winkel. Dieser Wert ist etwas größer als die oben ermittelten circa 4° , dies hat aber den Vorteil, dass das elektrische Signal, durch einen leichten festen Phasenversatz bei Drehmoment null schon einen Messwert liefern kann und auch der gewünschte Nennmess-

bereich im Betrieb leicht überschritten werden kann.

Systembewertung

Die hier aufgezeigte Auslegung ist stark gekürzt ausgeführt und nur beispielhaft zu sehen, einige Werte und Annahmen sind nur näherungsweise ermittelt und müssen für einen praktischen Einsatz genauer betrachtet und abgesichert werden. Insgesamt ist aber gezeigt, dass dieser Ansatz der einfachen und robusten Drehmomentmessung die Anforderungen erfüllen kann und für eine getriebetypische Umgebungsbedingung einsetzbar ist.

Das verwendete Konzept basiert auf einfachen elektrischen, elektronischen und mechanischen Komponenten, die verfügbar und kostengünstig sind. Jedoch müssen vor allem die mechanischen Rahmenbedingungen in der Applikation zu den Rahmenbedingungen des Gesamtkonzeptes passen. Der gezeigte Ansatz bietet grundsätzlich die Möglichkeit, auch positive und negative Drehmomente zu messen. Ein Hinzuziehen von Drehzahlinformationen und geeigneten Mittelungsfunktionen kann die Messergebnisse noch verbessern.

Weil eine Drehzahlmessung in den meisten Getrieben bereits vorgesehen ist, kann man bei diesem Konzept auch von Sensorfusion sprechen, da in diesem Fall nur eine zusätzliche Sensor-Geberrad-Konfiguration notwendig ist. Somit ist das Konzept eine Drehmomentmessung ohne sichtba-

rem Drehmomentsensor. Der Aufwand für die Auswertung im Steuergerät ist überschaubar. Das Konzept mit magnetischen Halldrehzahlsensoren eignet sich beispielsweise für große Getriebe mit rauen Umgebungsbedingungen und mittleren Anforderungen an die Messgenauigkeit. nw



Arno Erzberger

ist unabhängiger freiberuflicher Sensor-Technologieberater und Gründer von ONRASens. Er studierte Maschinenbau an der Universität Karlsruhe (T.H.) mit der Vertiefungsrichtung Mess- und Regelungstechnik sowie Schwingungslehre. Er war in drei deutschen Technologiekonzernen in der Sensorentwicklung, im technischen Vertrieb und in der Technologiestrategie tätig.